

FABRIKASI DAN KARAKTERISASI *SOLAR CELL* OKSIDA TEMBAGA YANG DIBUAT DENGAN TEKNOLOGI SEDERHANA

Hartati E. Sevie¹, Henri P. Uranus², Jessie Darma³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro

Universitas Pelita Harapan, Tangerang

e-mail: ²henri.uranus@uph.edu

ABSTRAK

Penelitian ini melaporkan fabrikasi dan karakterisasi *solar cell* yang dibuat dengan teknologi sederhana dan bahan dasar yang mudah diperoleh di Indonesia. Penelitian ditujukan untuk membuat *solar cell* dari oksida tembaga dan mencari kombinasi parameter proses dan komposisi material yang memberikan kinerja yang optimal. Perangkat uji sederhana dibangun dengan komponen yang mudah diperoleh di Indonesia. Karakterisasi dilakukan untuk berbagai konsentrasi larutan elektrolit dan lamanya waktu pembentukan oksida tembaga. Larutan elektrolit yang digunakan terbuat dari NaCl dan air, sedangkan lapisan oksida tembaga dibentuk melalui proses oksidasi termal. Eksperimen menunjukkan bahwa *solar cell* yang dihasilkan yang memiliki efisiensi optimal adalah proses oksidasi tembaga dilakukan pada suhu 550°C, selama 80-120 menit, dan konsentrasi larutan elektrolit sebesar 2-3 mol/l.

Kata kunci: *Solar cell*, oksida tembaga, larutan elektrolit, karakterisasi, kurva V-I

ABSTRACT

This research will discuss about the fabrications and characterizations of solar cell made by simple technology and materials which are available in Indonesia. The research aims at making solar cell from cuprous oxide and find combination of process parameters and materials' composition which give optimal performance. Simple characterization equipment was developed using components which are easily found in Indonesia. The characterizations were performed for various electrolyte concentrations and cuprous oxidation's durations. NaCl solution was used as electrolyte while the cuprous oxide layer was grown using thermal oxidation process. Experiments showed that the fabricated solar cell which has optimal efficiency is the one which electrode's oxidation process temperature is 550°C, heated for 80-120 minutes, and has electrolyte concentration of 2-3 mol/l.

Keywords: *Solar cell, cuprous oxide, electrolyte, characterization, V-I curve*

PENDAHULUAN

Solar cell adalah perangkat *photovoltaic* yang menghasilkan listrik DC langsung dari cahaya matahari. Harga *solar cell* komersial sudah

menurun banyak di dekade terakhir, sehingga pemakaiannya semakin meluas. Namun *solar cell* yang digunakan di Indonesia masih merupakan barang impor. Bahan baku silikon dan teknologi

proses *cleanroom* yang dibutuhkan merupakan factor belum dilakukannya produksi *solar cell* di dalam negeri. Sementara itu, Indonesia, khususnya wilayah Indonesia Timur merupakan wilayah dengan intensitas cahaya matahari yang cukup tinggi[1], sehingga penelitian *solar cell* merupakan hal yang menarik.

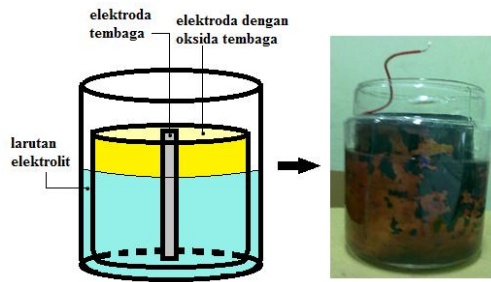
Tim peneliti sebelum ini telah melaporkan fabrikasi dan karakterisasi dari solar sel organik sederhana dengan memanfaatkan penyerapan cahaya oleh *dye* yang diekstraksi dari buah *blackberry* [2] yang dibuat dengan teknik sederhana tanpa menggunakan *cleanroom*. Namun *dye sensitized solar cell* tsb. masih membutuhkan kaca yang dilapis konduktor transparan yang perlu diperoleh dari luar negeri. Adalah menarik meneliti *solar cell* yang dapat dibuat dengan menggunakan bahan dan peralatan yang sepenuhnya ada di Indonesia. Sehubungan dengan hal ini, maka diangkatlah penelitian mengenai *solar cell* sederhana dengan oksida tembaga *amorphous* yang tidak memakan biaya yang besar dan dapat difabrikasi di Indonesia dengan peralatan sederhana tanpa fasilitas *cleanroom*. Studi mengenai preparasi lapisan oksida tembaga dan karakteristik *photovoltaic* dari *solar cell* oksida tembaga sudah dilaporkan [3] - [6] peneliti-peneliti sebelumnya. Penelitian *solar cell* dengan oksida tembaga juga sudah tim peneliti laporkan untuk konstruksi planar dengan *counter electrode* berbentuk jarring [7].

Dalam tulisan ini dilaporkan penelitian *solar cell* oksida tembaga dengan struktur yang berbeda, dengan elektrodanya berbentuk tabung, sehingga dapat menerima eksitasi cahaya dari berbagai sisi, yang dalam aplikasinya akan mempermudah orientasi sel terhadap perubahan posisi

matahari. Penelitian ditujukan untuk membuat *solar cell* dengan struktur tersebut, dan mencari kombinasi parameter proses (lama oksidasi) dan komposisi material (konsentrasi larutan elektrolit) yang menghasilkan kinerja optimal. *Solar cell* yang didiskusikan dalam makalah ini sepenuhnya bahan bakunya didapat di Jakarta dan prosesnya dilakukan di laboratorium yang ada di Universitas Pelita Harapan (UPH). Untuk keperluan karakterisasi, perangkat uji sederhana juga dibangun dengan komponen yang mudah diperoleh di Indonesia.

STRUKTUR DAN FABRIKASI SOLAR CELL

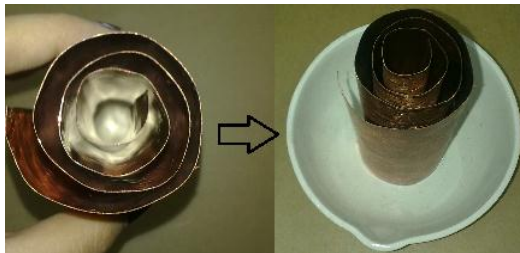
Struktur *solar cell* yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 1. *Solar cell* tersebut terdiri dari elektrode tembaga yang sisi peka cahayanya ditumbuhi lapisan oksida tembaga melalui proses oksidasi termal. Elektrode tersebut dibentuk melingkar dengan sisi oksida menghadap keluar, sedangkan elektrode yang lain (*counter electrode*) dibuat dari tembaga dan ditempatkan di tengah. Pertemuan antara oksida tembaga (*cuprous oxide*, Cu_2O) yang merupakan semikonduktor (pita energi selebar 2,137 eV) dan tembaga yang dilapisinya akan membentuk *Schottky junction* yang menghasilkan *barrier* energi yang akan membuat divais bersifat sebagai diode. Antara kedua elektrode diisi larutan elektrolit yang akan menjadi perantara aliran listrik antara kedua elektrode jika terjadi pembentukan pasangan elektron bebas dan *hole* akibat eksitasi oleh cahaya dengan energi foton melebihi pita energi oksida tembaga. Kedua elektrode dan larutan elektrolitnya ditempatkan dalam sebuah wadah kaca silinder yang diambil dari toples yang dibeli di pasar di Jakarta.



Gambar 1 Struktur *solar cell* yang dibuat

Proses fabrikasi *solar cell* ini cukup sederhana yaitu:

1. Lempengan tembaga yang bersih dipotong dengan ukuran 13,15" x 4" sebagai kutub anode, sedangkan untuk katodenya dipotong dengan ukuran 0,2" x 4". Dalam eksperimen ini digunakan lempeng tembaga komersial setebal 0,2 mm yang diperoleh dari toko besi di Jakarta.
2. Lempengan tembaga yang berukuran 13,15" x 4", dibentuk spiral berongga terlebih dahulu sebelum dipanaskan dengan tanur untuk menghasilkan lapisan oksida. Suhu pada tanur yang digunakan adalah 550 °C. Lamanya waktu pemanasan bervariasi. Selama pemanasan, atom tembaga di permukaan akan mengikat oksigen dan membentuk lapisan oksida tembaga. Lempeng tembaga yang dibentuk spiral berongga dan wadah keramik untuk penempatan ke dalam tanur dapat dilihat pada Gambar 2.
3. Setelah selesai pemanasan, lempeng tembaga didinginkan secara natural. Hasil yang didapatkan yaitu warna tembaga akan berubah menjadi kehitaman. Warna kehitaman ini bukanlah lapisan oksida yang diinginkan, tetapi lapisan di bawahnya yang berwarna kemerahan, ketika lapisan hitam tersebut terkelupas.
4. Lempeng tembaga tersebut dibilas dengan air mengalir dan dikeringkan. Lapisan tersebut tidak boleh digosok terlalu keras agar tidak merusak lapisan oksida yang diinginkan. Kemudian, salah satu sisi tembaga yang akan dihubungkan ke rangkaian luar, diampelas secara merata untuk membuang oksidanya.
5. Dua utas kabel pendek disiapkan untuk koneksi ke rangkaian luar. Kemudian salah satu kabel disolder pada sisi tembaga yang diampelas tersebut, serta kabel lainnya pada lempengan tembaga lain yang menjadi kutub katode.
6. Garam dengan takaran tertentu dimasukkan ke dalam toples kaca silinder dan air destilasi 740 ml ditambahkan, serta diaduk hingga garam larut semuanya. Air garam diatur agar tidak menutupi seluruh permukaan tembaga, melainkan meninggalkan $\pm 1''$ dari puncak lempeng tembaga agar tidak membuat kabelnya basah untuk menghindari efek elektro-kimia baterai.



Gambar 2 Lempeng tembaga berbentuk spiral berongga pada cawan keramik dipanaskan di tanur

PROSES KARAKTERISASI

Sejumlah *solar cell* telah difabrikasi dengan fasilitas laboratorium yang ada di UPH, Tangerang. Eksperimen-eksperimen dilakukan untuk mengkarakterisasi *solar cell* tersebut.

A. Parameter Proses dan Komposisi Material Pembentuk *Solar Cell*

Dalam percobaan ini, ada dua parameter yang digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik *solar cell*, yaitu:

1. Kadar garam dalam komposisi larutan elektrolit. Pada percobaan ini, air yang digunakan untuk melarutkan garam adalah air destilasi 740 ml. Beberapa takaran kadar garam digunakan dalam percobaan ini untuk menghasilkan larutan dengan konsentrasi 0,462 mol/l; 1,849 mol/l; 2,775 mol/l; dan 3,699 mol/l.
2. Waktu proses penumbuhan oksida tembaga dalam tanur. Beberapa waktu proses oksidasi yang digunakan untuk parameter percobaan ini adalah 15 menit; 1,5 jam; dan 3 jam.

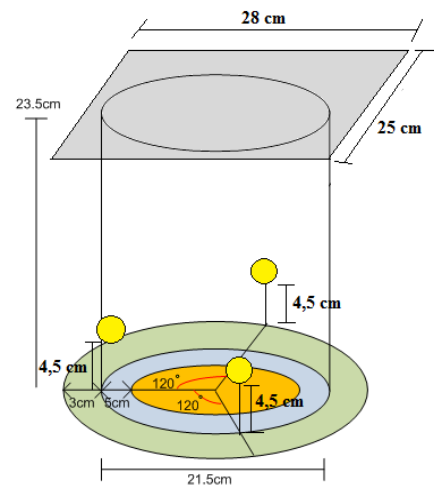
Pada percobaan dengan variasi larutan elektrolit, oksida tembaga ditumbuhkan dengan pemanasan selama 3 jam sedangkan pada percobaan dengan variasi lamanya proses oksidasi, kadar larutan elektrolit yang digunakan adalah 1,849 mol/l.

B. Rancangan Perangkat untuk Karakterisasi

Dalam pengambilan data, ada beberapa perancangan perangkat dan *set-up* pengukuran yang harus disiapkan terlebih dahulu. Perlengkapan yang harus disiapkan untuk pengukuran tersebut adalah:

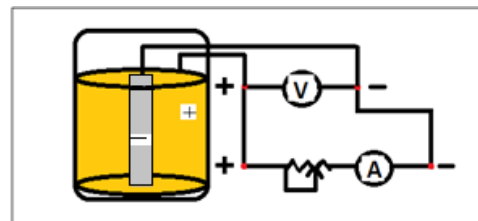
1. Ruang pencahayaan tertutup sebagai pengganti solar simulator yang tidak dimiliki team peneliti. Pada percobaan ini, ruang pencahayaan tertutup yang digunakan adalah wadah kedap cahaya berbentuk silinder. Wadah tersebut digunakan

sebagai ruang pencahayaan *solar cell* dengan tiga buah lampu halogen yang posisinya dirancang sedemikian rupa sehingga menyinari seluruh permukaan silinder *solar cell*, sementara tidak ada cahaya lain yang masuk ke dalam. Konstruksi wadah silinder ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Ukuran dan konstruksi wadah silinder dan jarak ketinggian lampu untuk karakterisasi *solar cell*; tiga bola kecil di gambar ini adalah lampu halogen

2. *Set-up* rangkaian untuk pengukuran karakteristik elektrik *solar cell* dapat dilihat pada Gambar 4. Volt meter digunakan untuk mengukur tegangan keluaran *solar cell*, sementara Ampere meter digunakan untuk mengukur arus yang ditarik oleh beban.



Gambar 4 *Set-up* rangkaian karakterisasi elektrik *solar cell*

Jika lampu halogen yang dipasang pada wadah silinder dihidupkan dan diarahkan pada *solar cell* yang berada didalam wadah, maka *solar cell* akan menghasilkan listrik, dan dapat dilakukan pengukuran karakteristik V-I untuk berbagai nilai tahanan beban yang berupa potensiometer. Kombinasi nilai tegangan *solar cell* dan arus yang ditarik beban merupakan titik data untuk kurva V-I dari *solar cell* yang diuji.

3. Pengukuran dilakukan berulang setiap lima menit untuk mempelajari degradasi karakteristik *solar cell*.

C. Pengukuran Intensitas Cahaya Lampu

Pada percobaan ini, cahaya yang digunakan adalah lampu halogen bermerek Halopika 20 Watt/220 Volt komersial sejumlah tiga buah. Lampu halogen digunakan sebagai sumber cahaya pengganti cahaya matahari agar karakterisasi *solar cell* dapat dilakukan secara konsisten dari satu pengukuran ke pengukuran berikutnya tanpa terpengaruh cuaca.

Intensitas lampu-lampu tersebut diukur dengan menggunakan *Luxmeter*. Hasil pengukuran *Luxmeter* ini kemudian dikonversi ke W/m² dengan memperhitungkan spektrum lampu dan spektrum penglihatan manusia untuk keperluan perhitungan efisiensi [8] - [8]. Rata-rata intensitas cahaya yang terukur yaitu 6991,667 *lux* yang untuk lampu yang digunakan adalah setara dengan 29,617 W/m²[10].

D. Ekstraksi Parameter Elektrik Solar Cell: Voc, Isc, Rd, Vm, dan Im dari Hasil Pengukuran

Karakteristik elektrikal *solar cell* diperoleh dengan pemrosesan matematik

terhadap hasil ukur V-I dengan mengikuti prosedur berikut ini.

Terhadap nilai-nilai V (tegangan) dan I (arus) yang terukur, dilakukan *curve fitting* ke persamaan model satu-diode [11].

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V}{m \cdot 26 \text{ mV}}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

dengan I , I_L , dan I_o masing-masing adalah arus *solar cell* terukur, arus foto, dan arus *reverse* jenuh diode (*dark current*). V adalah tegangan pada *solar cell*, m adalah faktor ideal diode, dan V_T adalah tegangan termal yang besarnya adalah 26 mV pada suhu ruangan.

Karena hasil V dan I ketika di-plot dalam grafik menunjukkan degradasi eksponensial, maka pada Persamaan model (1) dikalikan lagi dengan sebuah fungsi eksponensial, e^{-dV} dengan parameter degradasi $\frac{1}{d}$, sehingga persamaan modelnya menjadi Persamaan (2).

$$I = \left[I_L - I_o \left(\exp\left(\frac{V}{m \cdot 26 \text{ mV}}\right) - 1 \right) \right] \cdot e^{-dV} \quad (2)$$

Setelah memperoleh nilai I_L , I_o , m , dan d lewat proses *curve fitting* terhadap Persamaan (2), maka nilai tegangan *open-loop* V_{oc} , arus *close-loop* I_{sc} , dan tahanan dalam R_d juga dapat diturunkan. V_{oc} adalah V pada saat $I = 0$. I_{sc} adalah I_L , sehingga nilai I_{sc} juga dapat diketahui. Setelah I_{sc} dan V_{oc} diketahui, maka R_d dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3).

$$R_d = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3)$$

Kemudian, untuk menghitung tegangan dan arus saat daya maksimum (*MPP, maximum power point*), yaitu V_m dan I_m , maka dapat dicari maksima dari daya P dengan Persamaan (4).

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \quad (4)$$

dengan:

$$P = V \cdot \left(I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{m \cdot 26 \text{ mV}} \right) - 1 \right] \right) \cdot e^{-dV} \quad (5)$$

Dari Persamaan (4) dan Persamaan (5) diperoleh Persamaan (6) dan Persamaan (7):

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 = \frac{\partial}{\partial V} \left(V \cdot \left(I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{m \cdot 26 \text{ mV}} \right) - 1 \right] \right) \cdot e^{-dV} \right) \quad (6)$$

$$0 = I_L e^{-dV} (1 - dV) - I_0 e^{-dV + \frac{V}{m \cdot 26 \text{ mV}}} \cdot \left(1 + \frac{V dm(26 \text{ mV}) + V}{m \cdot 26 \text{ mV}} \right) + I_0 e^{-dV} (1 - dV) \quad (7)$$

Persamaan (7) diselesaikan secara numerik dengan metode *bisection* untuk mendapatkan nilai V . Setelah nilai V di atas diketahui ($V = V_m$), maka nilai I_m dapat dihitung dengan memasukkan nilai V_m ke dalam Persamaan (2).

E. Efisiensi Solar Cell

Rumus untuk menghitung efisiensi *solar cell* seperti pada Persamaan (8).

$$\eta = \frac{P_m}{P_L} \times 100\% \quad (8)$$

dengan:

η : Efisiensi.

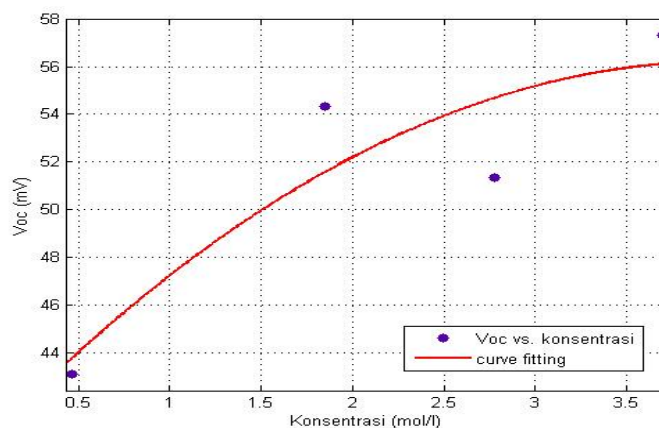
P_L : Daya cahaya lampu (Watt). Nilai parameter ini didapatkan dari nilai intensitas cahaya rata-rata yang terukur dalam W/m^2 dikalikan dengan luas permukaan peka cahaya dari *solar cell*.

P_m : Daya maksimum yang dihasilkan *solar cell* (Watt) berupa tegangan V_m dikalikan dengan arus I_m .

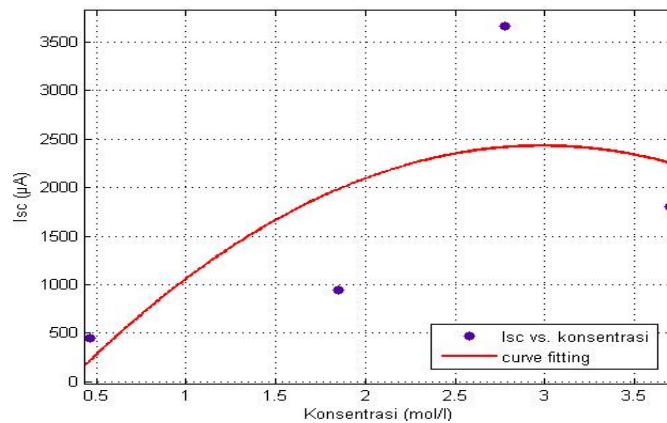
ANALISIS HASIL PERCOBAAN

Terhadap setiap sampel *solar cell* yang difabrikasi dilakukan proses pengukuran kurva V-I dan ekstraksi parameter elektrikal dengan mengikuti cara yang dijelaskan di bagian depan. Untuk setiap kombinasi parameter proses dan komposisi larutan elektrolit dilakukan 3 (tiga) kali pengulangan dan hasilnya dirata-rata.

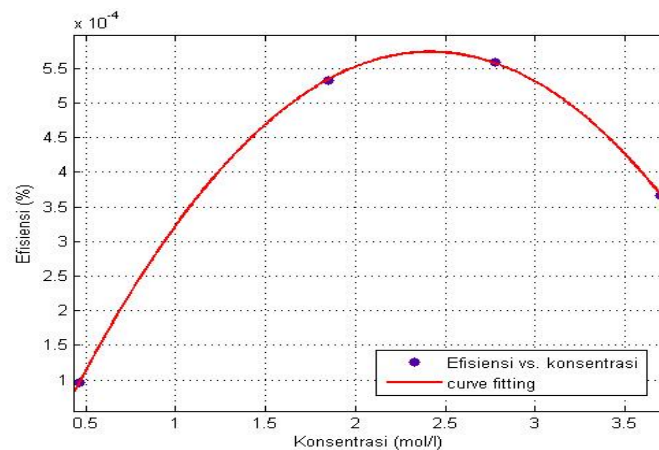
Hasil-hasil percobaan dari pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kinerja solar cell dapat dilihat dalam Gambar 5 s/d Gambar 10. Dalam gambar-gambar tersebut titik adalah hasil eksperimen, sedangkan garis adalah hasil *curve fitting* ke persamaan model polinomial.



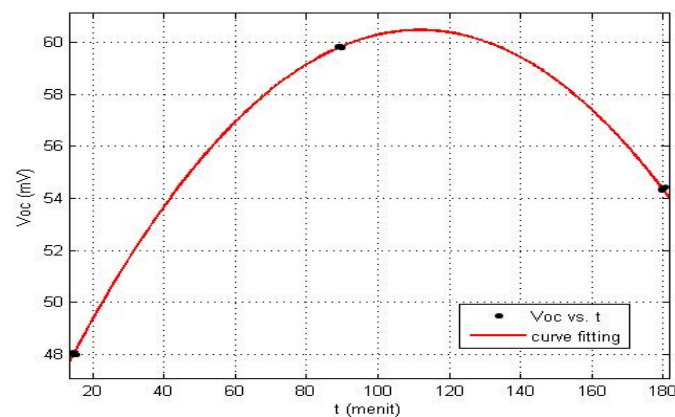
Gambar 5 Hasil eksperimen dan *curvefitting* hubungan antara rata-rata tegangan V_{oc} dengan parameter konsentrasi larutan elektrolit untuk oksidasi tembaga 180 menit



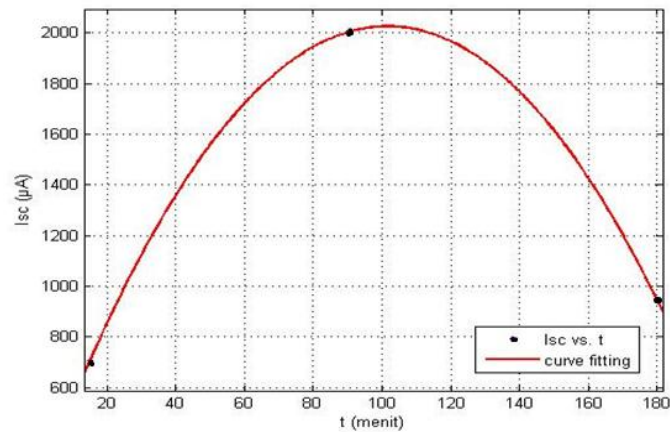
Gambar 6 Hasil eksperimen dan *curve fitting* hubungan antara rata-rata arus I_{sc} dengan parameter konsentrasi larutan elektrolit untuk oksidasi tembaga 180 menit



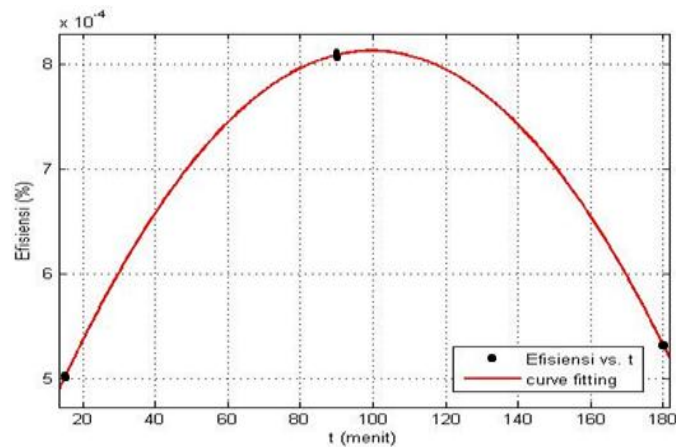
Gambar 7 Hasil eksperimen dan *curve fitting* hubungan antara efisiensi *solar cell* dengan konsentrasi larutan elektrolit untuk oksidasi tembaga 180 menit.



Gambar 8 Hasil eksperimen dan *curve fitting* hubungan antara rata-rata tegangan V_{oc} dengan lamanya proses oksidasi tembaga untuk larutan elektrolit 1,849 mol/l



Gambar 9 Hasil eksperimen dan *curve fitting* hubungan antara rata-rata arus I_{sc} dengan lamanya proses oksidasi tembaga untuk larutan elektrolit 1,849 mol/l.



Gambar 10 Hasil eksperimen dan *curve fitting* hubungan antara efisiensi *solar cell* dengan lamanya proses oksidasi tembaga untuk larutan elektrolit 1,849 mol/l

Data yang ditampilkan di gambar-gambar tersebut adalah untuk saat *solar cell* baru dirakit. Hasil-hasil ini masih bersifat penda-huluan dan dibutuhkan klarifikasi dengan percobaan-percobaan yang lebih masif. Klarifikasi akan dilakukan untuk penelitian mendatang. Namun, data yang sekarang disajikan menunjukkan adanya parameter proses dan komposisi material optimal yang akan didiskusikan berikut ini.

Pada Gambar 7, untuk konsentrasi larutan yang paling pekat 3,699 mol/l, terlihat nilai efisiensi *solar cell*-nya lebih kecil daripada konsentrasi larutan 2,775 mol/l. Hal ini disebabkan semakin pekatnya larutan elektrolit akan membuat ion-ion dalam larutan menjadi semakin rapat, sehingga gerakan aliran elektron menjadi tidak bebas.

Pada Gambar 10, untuk proses oksidasi yang paling lama 180 menit, terlihat nilai efisiensi *solar cell*-nya lebih kecil daripada proses oksidasi 90 menit. Hal ini disebabkan semakin lamanya proses oksidasi akan membuat semakin tebal lapisan oksidanya, sehingga perjalanan elektronnya semakin panjang yang memperbesar kemungkinan rekombinasi elektron bebas - *hole* terjadi sebelum pembawa muatan berhasil melintasi divais.

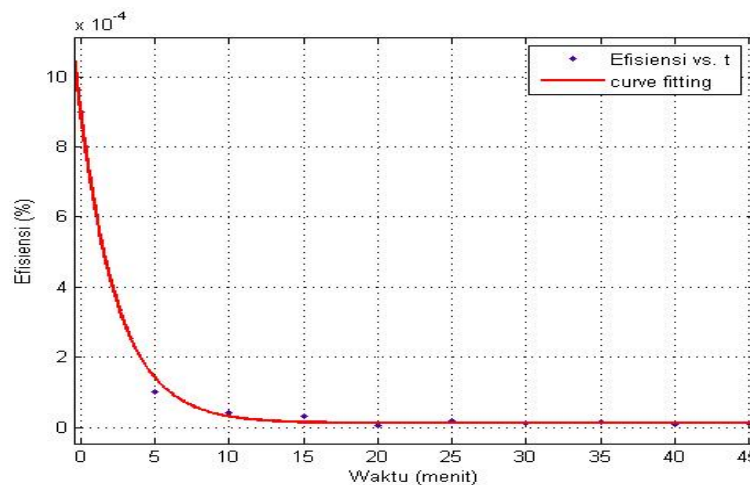
Pada percobaan dengan variasi kedua parameter tersebut, terlihat adanya nilai optimal untuk konsentrasi larutan elektrolit dan lamanya proses oksidasi termal. Efisiensi *solar cell* akan optimal jika konsentrasi larutan yang digunakan berkisar 2-3 mol/l (pada Gambar 7 titik puncaknya berada pada nilai 2,4135 mol/l) dan lamanya proses oksidasi tembaga berkisar 80-120 menit (pada Gambar 10 titik puncaknya berada pada nilai 99,666 menit).

Dari pengukuran *V-I* diamati juga, bahwa kinerja *solar cell* yang dibuat

mengalami degradasi $e^{-t/\tau}$ dengan koefisien degradasi $\tau = 2,604$ menit untuk oksidasi tembaga 180 menit dan untuk larutan elektrolit 2,775 mol/l seperti diperlihatkan pada Gambar 11.

SIMPULAN

Penelitian ini telah melaporkan kegiatan fabrikasi dan karakterisasi *solar cell* sederhana menggunakan bahan dan peralatan yang ada di Indonesia, khususnya di laboratorium UPH. Efisiensi *solar cell* dengan oksida tembaga yang dibuat akan optimal jika konsentrasi larutan yang digunakan berkisar 2-3 mol/l dan lamanya proses oksidasi tembaga berkisar 80-120 menit. Efisiensi *solar cell* yang dibuat memang masih rendah, namun keberhasilan fabrikasi ini menunjukkan bahwa *solar cell* tersebut dapat dibuat dengan peralatan sederhana di Indonesia. Studi lebih lanjut untuk optimasi kinerja divais akan menjadi topik penelitian lanjutan di kemudian hari.



Gambar 11 Hasil eksperimen dan *curve fitting* hubungan antara efisiensi *solar cell* dengan waktu hidup untuk lamanya proses oksidasi tembaga 180 menit dan larutan elektrolit 1,849 mol/l

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Loster, http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/. Diakses 3 Mei 2017.
- [2] S. L. Tanihaha, H. P. Uranus, and J. Darma. 2010. *Fabrication and Characterization of Dye-sensitized Solar Cell using Blackberry Dye and Titanium Dioxide Nanocrystals*, Proc. The 2010 Second International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies (ACT 2010), Jakarta, Indonesia, 2 – 3 Dec. IEEE Computer Society, Association of Computer, Electronics, and Electrical Engineers (ACEE), and Bina Nusantara University, pp. 60 – 63.
- [3] A. E. Rakhshani. 1986. Preparation, characteristics, and photovoltaic properties of cuprous oxide: a review. *Solid State Electronics*, Vol. 29, No. 1, pp. 7 – 17.
- [4] B. P. Rai. 1988. Cu₂O Solarcells: areview. *Solar Cell*, Vol.25, pp. 265-272,
- [5] R. N. Briskman. 1992. A study of electrodeposited cuprous oxide photovoltaic cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 27, pp. 361-368.
- [6] W. M. Sears and E. Fortin. 1984. Preparation and properties of Cu₂O/Cu photovoltaic cells. *Solar Energy Materials*, Vol. 10, pp. 93 – 103.
- [7] S. Basuki, H. P. Uranus, dan J. Pangaribuan. 9 Jan 2015. Fabrication and Characterization of Cuprous Oxide Solar Cell with Net-shaped Counter Electrode. *SPIE Proceeding*, Vol. 9444, pp. 94440L-1 – 94440L-6.
- [8] I. Ashdown. Oktober 2002. *Photometry and Radiometry, Radiosity: A Programmer's Perspective*.
- [9] *International Commission on Illumination*, <http://www.cie.co.at>, diakses pada tanggal 3Mei 2017.
- [10] H. E. Sevie. 2010. *Fabrikasi dan Karakterisasi Solar Cell Sederhana dengan Oksida Tembaga*, Laporan Tugas Akhir S1, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Pelita Harapan,
- [11] H.P. Uranus. 2010. Optoelectronics: Light Detection and Imaging. *Catatan Kuliah Optoelektronika*, Universitas Pelita Harapan.